

Characteristics and control of intermittent flow in water distribution systems due to restricted supply

상수도관망에서 제한급수에 따른 간헐적 흐름의 특성 및 제어

Kangseung Yang¹ · Donghong Kim¹ · Kwansoo Jung² · Juhwan Kim^{1*}

양강승¹ · 김동홍¹ · 정관수² · 김주환^{1*}

¹한국수자원공사 · ²충남대학교 토목공학과

Abstract : The water distribution system should be invariably operated on continuous pattern for 24 hours a day. Occasionally, it is not practically possible to operate for 24 hours due to water shortage or financial constraints. Therefore an intermittent water supply is unavoidable in water shortage area and developing countries.

But the intermittent water supply can introduce large pressure forces and rapid fluid accelerations into a water supply network. These disturbances may result in new pipe failure, leakage and secondary contamination.

This paper proposed an improvement methodology to prevent the disturbances by intermittent water supply. For the study, the hydraulic variation of intermittent flow in water distribution system was measured and analyzed in the field by comparing with simulation of hydraulic model. Installations of control valves such as, pressure reducing and sustaining and air valves were employed for pressure and flow control. The effectiveness of the methods are presented by comparing hydraulic conditions before and after introducing the proposed solutions.

Key words : restricted water supply, air release, pressure control, intermittent flow

주제어 : 제한급수, 공기배제, 수압제어, 간헐흐름

1. 서론

우리나라의 수돗물 생산 및 공급은 국가산업과 국민건강 및 소비활동에 직결되는 필수적인 요소로서, 산업화 및 도시화와 더불어 그동안 양적인 면에서 많은 성장을 거듭하여 왔다. 1961년 상수도가 본격적으로 보급되기 시작한 이후 2010년 12월 말 현재 전체인구의 94.1%인 약 48,395천 명이 상수도를 공급받고 있다(환경부, 상수도통계, 2011). 이러한 상수도의 눈부신 양적성장

도 불구하고 일부 지역에서는 매년 수돗물 생산/공급량이 국민의 물수요량보다 부족하여 이를 해결하기 위한 제한급수를 실시하고 있는 실정이다. 실례로 강원도 태백지역에서는 가뭄으로 인하여 2008년 9월부터 2009년 4월까지 87일 동안 제한급수가 실시되어 2009년 한 해만 890억원(태백시 가뭄백서, 2009)의 추정 피해를 입은 바 있으며, 이 피해는 가뭄이외에도 유수율이 50%에도 미치지 못하는 상수도관망 관리의 미흡이 또 하나의 중요한 원인으로서 지적된바 있다.

대체수자원의 확보가 되지 않은 상태에서 부족한 수량을 해소하기 위해 불가피하게 수행되는 제

* Received 26 July 2013, revised 19 December 2013, accepted 30 December 2013.

* Corresponding author: Tel : +82-42-870-7501 Fax : +82-42-870-7549 E-mail : juhwan@kwwater.or.kr

한급수는 상수관망의 수리학적 측면에서 수돗물로 가득 채워져 있던 관내 수돗물이 모두 외부로 배출됨으로 인하여 부압을 발생시키고 또 채워져 있던 물 대신에 공기를 채우게 됨에 따라 오염된 물질의 유입 가능성과 인접관로의 급격한 수압저하 등을 야기하고, 이와 반대로 급수를 재개하는 경우에는 관내 공기를 수돗물이 밀어내는 힘에 의해 관내 급격한 압력의 변화 즉, 수충격을 발생시켜 관파손, 연결부 이탈 등 관망의 구조적 안전성에 영향을 미치게 된다. 또한 수질적인 측면에서는 관내 침전물질의 배출로 탁수가 발생하기도 한다. 그러나 이와 같이 가뭄, 수원 부족 등과 같은 경우에 불가피하게 실시될 수밖에 없는 제한급수에 대해서 환경부 상수도시설 기준 등 아직까지 국내에서는 제한급수 시의 관망에 미치는 수리, 수질 등의 영향에 대한 분석과 이를 관리하기 위한 적정운영의 가이드라인에 대한 연구가 부족한 실정이다.

본 연구에서는 수돗물 부족의 문제를 일시적으로 해결하거나 물이 부족한 지역 또는 국가에서 불가피하게 시행할 수밖에 없는 제한급수가 상수관망에 미치는 영향을 수리적 특성의 현장 측정과 관망해석 모델 구축을 통해 분석하고 그 영향을 최소화 할 수 있도록 제어할 수 있는 방안을 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 연구동향

제한급수시의 상수관망 운영에 대한 국내연구는 매우 부족한 실정이다. 제한급수와 관련된 대표적인 연구사례로는 Lee et al (1996)의 가뭄시 제한급수에 따른 문제점 조사/분석 연구가 있다. 이 연구에서는 상수도 관리자와 공업용수 관리자로부터 제한급수 실시에 따른 문제점을 설문하여 문제점을 분석하였으며, 분석결과 상수도 관리자의 경우 고지대 등의 출수불량을, 공업용수 관리자의 경우 원인과 예보가 불충분하다는 것이 제한 급수의 가장 큰 문제로 분석된 바 있다.

국외의 경우 물 사정이 여의치 않은 중동지역이나 아시아 등의 개발도상국에서 불가피하게 발생하는 제한급수와 관 파손, 지진 등과 같은 관망의 구조적 손상으로 인한 비상제한급수 운영에 대한 연구들이 다양하게 보고되고 있다. Rajiv (2003)는 개발도상국의 경우 물공급이 수요를 충분히 만족시킬 수 없음에도 불구하고 기존의 24시간 연속급수의 경우에 대한 설계기법과 해석 모델들이 그대로 적용되고 있어 운영상의 많은 문제점을 초래하고 있다고 하였다. 특히, 관망설계에 사용되는 DDA (Demand Driven Analysis) 방식의 관망해석 모델에서는 각 절점의 수요량은 설계요구수량을 항상 만족하는 것으로 해석되기 때문에 제한급수시의 관망상태를 정확히 모의 할 수 없으므로 수압과 공급량 사이의 관계를 고려할 수 있는 HDD(Head Driven Demand) 또는 PDD(Pressure Driven Demand) 등이 고려된 모델의 필요성에 대해 언급하였다. 또한 Varimoorthy (2001)는 제한급수가 실시된 관로는 물이 가득 차 있는 관수로의 수리특성을 완벽하게 재현 하지 않기 때문에 이에 대한 고려도 필요하다고도 언급하였다. Kalanithy (1997)는 연속 공급체계를 기준으로 하는 설계방법에 대한 문제점을 제시하였으며, 제한급수체계에 적합한 설계방안을 제안하였다. 공급시간이 짧은 제한급수구역의 경우 수용가들은 통상적으로 공급시간대 가능한 한 많은 양의 물을 받으려 하며, 미급수 시간대 물 사용을 위하여 충분히 물을 저장할 수 있는 탱크설비를 갖추고 있다. 이러한 특징을 고려하여 수리모델 구축시 각 절점에는 수용가 소비형태를 반영한 수요패턴에 기초하지 않고 일시적인 최대 물수량을 반영한다. 이 경우 각 절점의 수요는 배급수관망에 발생된 수압에 따라 결정되기 때문에 제한급수체계에 적용 가능한 관망해석을 위하여 수압종속 수요배분방식(PDD; Pressure Dependent Demand)를 제시하였다. Surendran (1997)은 상수관망의 관경과 같이 관망의 수송용량을 산정하는 경우에는 첨두수요량을 고려하

는 것이 일반적이다. 그러나 제한급수가 실시되는 관망은 24시간 연속급수가 가능한 관망에 비하여 침두수요 시간계수가 낮게 나타나며 일반적으로 1 ~ 1.3을 나타내는 것으로 보고하고 있다. 이것은 제한급수가 실시되고 있는 개발도상국의 수용가들은 물탱크를 사용하기 때문에 일반적인 2개의 침두시간대를 나타내는 물수요패턴이 나타나지 않기 때문이라고도 할 수 있다. Lingrireddy (2002)는 제한급수시 관내 물이 빠진 공간을 공기가 채우게 되며 급수가 재개되는 경우 이 공기가 빠져나갈 수 있는 공기밸브의 설치가 필요한 것으로 보고하고 있으며 Paul (2002)은 공기가 섞여 있음으로 인해 관로는 설계용량보다 적은 양의 물이 공급되는 것을 방지하기 위해 공기밸브를 적정지점에 설치함으로써 약 32 % 가량의 송수용량을 증가시킬 수 있음을 보여주었다.

2.2 기본 이론

관수로를 흐르는 흐름문제를 푸는데 있어서 질량, 운동량 및 에너지 보존법칙은 기본적인 개념이며 이로부터 간략하게 유도될 수 있다. 또 저류시설에서 유입되는 유량에서 유출 유량을 고려하면 단위시간별 저류되는 유량은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dV}{dt} = Q_{in} - Q_{out}$$

즉, $\frac{dV}{dt} = I(t) - Q(t)$ (1)

여기서, dV/dt : 시간별 저류량의 변화

$Q_{in}, I(t)$: 시간별 유입량

$Q_{out}, Q(t)$: 시간별 유출량

모든 흐르는 물체가 갖는 에너지는 베르누이 식으로부터 구할 수 있는데 일반적으로 다음과 같다.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \sum h_{L1-2} \quad (2)$$

여기서 V : 평균유속, g : 중력가속도,

z : 표고, P : 압력

관망해석은 주어진 관경, 관길이 및 관내 조도계수를 갖는 관로로 구성되어 있는 관내에서 저수지, 배수기지 수위 또는 특정 절점의 수위와 각 절점에서 사용수량이 주어진 조건에서 각 지점에 대한 물의 흐름 및 수압상태를 명확하게 계산하는 것을 가리킨다. 관망해석 모형은 다수의 상용 프로그램이 있으나 본 연구에서는 국내에서 일반적으로 널리 사용되고 있는 미국 환경청 (USEPA)에서 제공되는 EPANET 모형을 활용하였다. EPANET모형은 앞에서 언급한 DDA방식의 관망해석 모형으로 제한급수체계에 적합한 모의가 이루어지기 위해서는 PDD방식과는 달리 설계자가 여러 가지 대안을 설정하여 시나리오별 모의결과를 분석함으로써 이루어질 수 있다.

3. 대상지역 선정 및 특성분석

본 연구를 위한 대상관망은 현재 제한급수를 실시하고 있는 도서지역으로서 육지도를 대상으로 하였으며 행정구역상으로 통영시 육지면에 속한다. 육지급수구역은 육지저수지를 취수원으로 육지정수장에서 정수하여 육지면 일원에 용수를 공급중으로 면적은 12.73 km², 급수인구는 총 2,403인으로 조사되었으며 육지정수장의 시설용량이 800 m³/일로 취수원 부족으로 생산량이 제한적이고 누수율이 높아 2개의 A구역과 B구역으로 관리되고 있으며 특히, 하루 3시간씩 제한적으로 급수가 되고 있는 실정이다. 즉, A구역(상촌, 중촌, 동촌, 서촌, 자부, 불곡)은 매일 오전 07:00부터 10:00까지 공급, B구역(입석, 관청, 야포)은 매주 월요일, 수요일 및 금요일 3일간 10:30부터 14:00까지 제한적으로 공급되고 있으며 평균 유수율은 2010년도를 기준 평균 45 %이다.

대상지역의 상수도시설은 Table 1에 정리하였으며 여기에서와 같이 취수장, 정수장 및 배수지는 각 1개소가 있으며, 육지정수장의 시설

Table 1. Status of water supply facilities

source (m ³ /day)	Water Treatment Plant(m ³ /day)	Reservoir (m ³ /day)	Pipe length(m)			
			total	transmission line	distribution line	service line
800	800	850	20,583	313	13,874	6,396

Table 2. Surveying status for hydraulic characteristics

	Period	No. of sites	Remark
Pressure(self recording type)	Jan. 1 st ~ 10 th , 2011	7	
Pressure(handy type)	Dec. 29 th , 2010	11	
	Jan. 14 th , 2011	19	
Flow	Jan. 1 st ~ 10 th , 2011	1	outlet of water tank

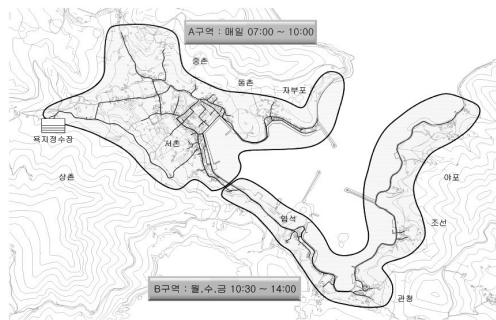
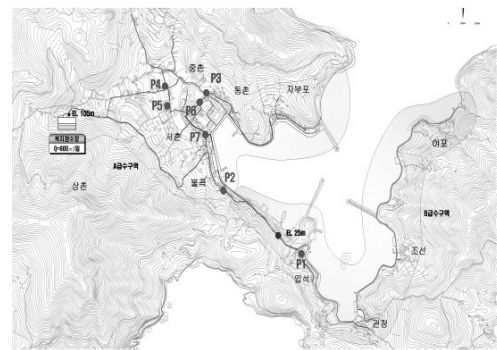
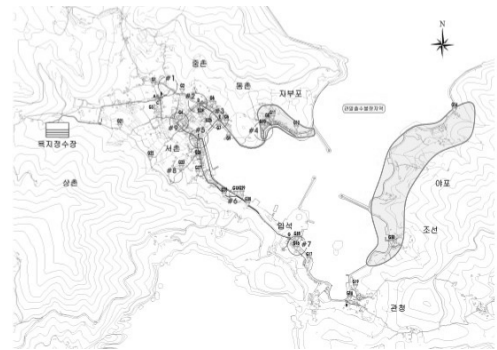


Fig. 1. Water distribution systems of study area



(a)



(b)

Fig. 2. Measuring sites of self recording(a) and handy type(b) pressure gauge

용량은 총 800 m³/일로 관로 21 km를 통하여 522개소의 수용가에 약 602 m³/일의 생활용수를 공급하고 있다.

본 연구의 대상지역은 제한급수가 실시되고 있는 지역으로서 수리적 특성을 분석하기 위하여 유량 및 수압을 측정하였다. 측정기간은 2010년 12월 및 2011년 1월이며, 수압측정은 간이수압계 및 자기기록식 수압계를 활용하였으며, 유량은 욕지정수장 유출 유량계를 활용하여 측정하였다. 측정기간과 지점은 Table 2와 같으며 자기기록수압계 설치위치와 간이수압계 측정지점을 Fig. 2에 도시하였다.

4. 급수구역 수리특성

욕지급수구역은 2개의 구역으로 구분하여 제한급수를 실시하고 있어 2개 급수구역으로 구분하여 공급특성으로서 수리거동을 파악하였다. 관망해석모형의 입력자료인 관경 및 관길이

는 통영시에서 관리중인 CAD도면과 GIS DB를 참고로 활용하였으며 절점좌표 및 표고는 수치지도를 이용하여 추출하였다. 절점별 물 사용량은 관망해석에 있어 중요한 요소 중 하나로 GIS DB에 구축된 수용가 및 급수정보와 수용가 요금관리시스템 자료를 연계하여 사용하였다. A급수구역은 상촌, 중촌, 동촌 등으로 오전 7:00 ~

Table 3. Outflow to A district from reservoir

Elevation(m)	Flow(m ³ /hr)			Remark
	Min.	Max.	Mean	
105.9	0.0	223.3	100.2	

Table 4. Pressure(kg/cm²) and total head(m) in A district (Jan. 1st ~ 10th, 2011)

Site	Elevation(m)	Min.		Max		Mean	
		Pressure(m)	Total Head(m)	Pressure(m)	Total Head(m)	Pressure(m)	Total Head(m)
P2	5.2	0.0	5.2	10.32	108.4	5.70	62.2
P3	3.6	0.0	3.6	2.88	32.4	1.48	18.4
P4	10.5	0.0	10.5	8.84	98.9	4.62	56.7
P5	11.4	0.1	12.4	9.50	106.4	5.08	62.2
P6	4.5	0.0	5.3	10.07	105.2	5.57	60.2
P7	6.0	0.0	6.6	10.03	106.3	5.57	61.7

10:00 사이에 용수를 공급하고 있다. 수압 및 유량분석은 2011년 1월 7일부터 10일 사이에 측정된 자료를 활용하였으며, 1월 7일은 오전 9:50 분까지 공급하였고, 1월 8일은 관내 누수 등 수압저하 원인을 조사하기 위한 밸브조작을 위해 10:30분까지 추가공급을 실시하였다.

Table 3과 4에서는 각각 A급수구역으로 유입되는 배수지 유량과 측정된 수압 특성을 수록하였다.

4.1 A급수구역

A급수구역의 2011년 1월 7일 동안의 유량 및 수압 변화를 Fig. 3에서 살펴보면 총 4단계로 구분하여 분석할 수 있다. 1단계는 급수시작 후 관 충수단계, 2단계는 수압상승 단계, 3단계는 수압유지 단계, 4단계는 급수차단 단계로 구분하였다.

1단계는 급수시작 후 비워진 관을 채우는 충수단계로 유량이 급격하게 증가되고 있으나, 관망내 수압은 형성되지 않은 단계이다. 여기에서는 물이 공급되면서 관내 채워져 있던 공기가 급격하게 배출되는데 약 5분간 소요된다. 2단계는 수압상승 단계로 저지대 지역의 관 충수가 어느 정도 완료되어 관내 수압이 상승하고 유량은 감

소하는 경향을 보이거나, 수압은 급격하게 상승하는 단계로 관로에 충격을 발생시키는 단계로 약 1시간 5분간 지속된다. 특히, 약 5분만에 수압이 0 kg/cm²에서 4 kg/cm²까지 상승하는 현상을 보인다. 3단계는 수압유지 단계로서 관내에 물이 완전히 채워져 수압 및 유량이 안정화된 상태로 수압에 따라 수용가에 물이 정상적으로 공급되며 약 1시간 40분간 지속되며 누수가 있을 경우 누수가 발생된다. 4단계는 급수차단 단계로 유량은 “0”이 되나, 관내 충수물량으로 인해 수압은 천천히 감소하는 경향을 보인다. 이때, 수압감소 속도는 해당지역의 누수량 또는 사용량 여부에 따라 변한다. 또한, 보편적으로 제한급수지역의 경우 대부분 직수공급이 아닌 물탱크를 사용하는 형태임을 고려할 때, 관내 압력 및 충수물량이 소진될 때까지 누수량 및 사용량

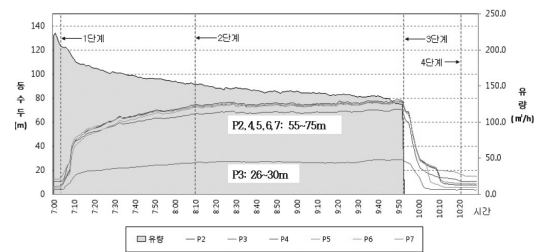


Fig. 3. Variation of total head and flow in A district (2011년 1월 7일)

으로 추정된다.(약 30분)

A급수구역의 동수두는 배수지 표고(약 EL .106 m)를 감안할 때, P2, P4, P5, P6, P7 지점은 약 31 m ~ 51 m의 수두저하가 발생하고, 특히, 3단계 P3지점(중촌마을)은 76 ~ 80 m의 급격한 수두저하가 발생하였다. 이는 P3지점 인근에 누수 또는 공기정체 등이 원인으로 판단되었다.

P3지점 인근에 누수 또는 공기정체 등의 원인으로 수두저하가 발생하는 것으로 예상됨에 따라 P3 전단의 #2 제수밸브를 차단한 이후에 간 이수압계로 압력을 측정하였다(Fig. 4). 그 결과, P3 전단 지점들(P2, P4, P5, P6, P7, G8, G10)에 있어 압력은 증가하고 유량은 밸브차단 이전 136 m³/hr에서 차단 후 68 m³/hr로 공급량의 절반인 약 68 m³/hr이 감소하는 것을 확인할 수 있어, P3 지점 인근 이후에 누수가 있는 것으로 판단하였다.

A급수구역의 관망해석 결과 Fig. 6에서와 같이 동수두는 60 ~ 80 m인 것으로 모의되었으며, 누수발생 지점으로 판단되는 P3지점 동수두

는 30 m 이하로 해석되었다. 이는 A급수구역 수압 및 동수두 실측 분석결과와 매우 유사한 형태를 보이는데, 수압유지 단계인 3단계의 동수두가 약 55 ~ 75 m이고, P3지점의 동수두가 약 25 ~ 30 m로 실제 측정값과 해석값이 매우 유사한 것으로 나타났다. 특히 중촌마을 누수지점 확인을 위한 밸브차단(#2)을 모의하기 위해 동일 계통 관로를 폐쇄하여 해석한 결과, 동수두가 90 m 이상으로 실측값 동수두 85 ~ 100 m와 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이는 A구역의 수압저하 원인이 누수라는 것을 의미하고 있다는 사실을 수리해석을 통해 확인하는 것이다.

4.2 B급수구역

B급수구역의 공급지역은 입석, 관청, 야포지역으로 10:30 ~ 14:00 사이에 용수를 공급하고 있다. 수압 및 유량분석은 2011년 1월 7일 ~ 10일에 측정된 자료를 활용하였으며, A급수구역과 마찬가지로 관망내 수압저하를 보여 수압저하 원인을 조사하기 위한 밸브조작을 1월 7일 실시하였고, 밸브조작으로 인해 14:25분 까지 추

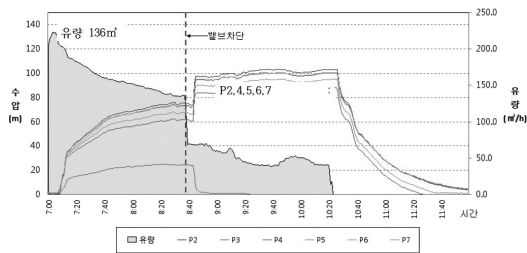


Fig. 4. Variation of total head and flow by valve closing in A district (2011.1.8.)



Fig. 5. Leakage candidate pipes in A district

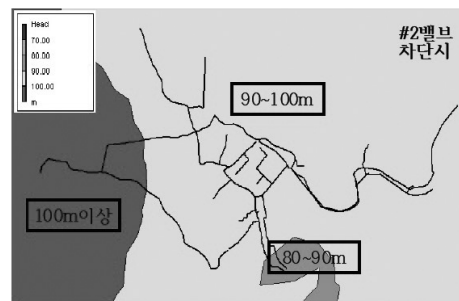
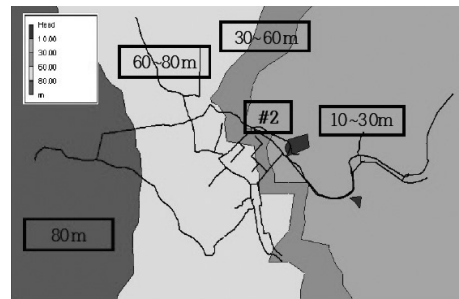


Fig. 6. Pressure distribution of A district before and after valve closing

Table 5. Outflow to B district from reservoir

Elevation(m)	Flow(m ³ /hr)		
	Min.	Max.	Mean
105.9	0.0	219.2	61.1

Table 6. Pressure(kg/cm²) and total head(m) in A district (2011.1.7. ~ 10)

Site	Elevation(m)	Min.		Max		Mean	
		Pressure(m)	Total Head(m)	Pressure(m)	Total Head(m)	Pressure(m)	Total Head(m)
P1	4.1	0.0	4.1	2.73	31.4	1.68	20.9

가 공급하였다.

B급수구역의 1일(2011년 1월 7일) 유량 및 수압 변화를 Fig. 7에서 살펴보면 A급수구역과 마찬가지로 총 4단계로 구분하여 나타나며, 다소 상이한 점은 2단계의 시간이 약 10분, 4단계의 시간이 약 10분으로 나타났다. 이는 구역의 관망 여건 상이에 따른 것으로 판단된다. A급수구역은 격자형 관망으로 수용가가 많고 고지대에서 저지대로 공급하는 체계이고, B급수구역은 수지상식 관망으로 수용가가 적고 고지대→저지대→고지대로 공급하는 체계에 따른 것으로 판단된다. 또한, 동수두 분석결과, 배수지 표고가 약 106 m(운영수위 + 0 ~ 4 m)임에도 불구하고 3단계의 관내 동수두는 약 25 ~ 30 m로 관내 약 76 ~ 81 m의 과도한 수두저하가 발생하였다. P1지점 인근의 전단 동수두가 약 51 ~ 60 m인데 반해, 후단은 동수두가 25 m로서 약 35 m의 급격한 수두손실이 발생되는 것을 확인할 수 있었다. A구역과 마찬가지로 동구간에 대해 누수가 의심이 되어 P1지점 전단에 설치된 제수밸브를 차단하였으나, A급수구역과 다르게 P1지점 전단에서 수압상승은 발생하지 않아 이는 관내 공기정체로 인한 통수단면적이 감소되었기 때문인 것으로 추정할 수 있으며 추정구간은 Fig. 8에서 볼 수 있다.

B급수구역 모의결과 Fig. 9와 같이 관내 동수두는 40 ~ 100 m인 것으로 해석되었으며, 공기정체로 인한 수압저하가 예상되는 고지대 전단부는 동수두가 90 m 이상이며, 고지대 이후

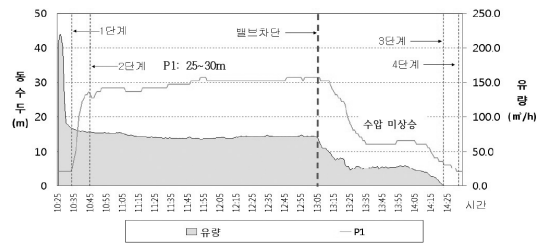


Fig. 7. Variation of total head and flow at B district (Jan, 7th, 2011)



Fig. 8. Flow obstruction by air in pipe line at B district

의 동수두는 44 ~ 90 m로 해석되었다. 이는 B구역 수압 및 동수두 실측분석 결과와 매우 상이한 형태를 보이는데, 고지대 전단부 즉, P1지점 전단구간에서 측정된 수압유지 단계인 3단계의 동수두가 51 ~ 60 m 임을 고려할 때 약 30 ~ 39 m의 차이를 보이며, 또한 고지대 후단부인 P1지점 후단구간에서 측정된 동수두가 약 25 ~ 30 m임을 고려할 때 약 60 ~ 65 m의 차이를 보인다. 또한 P1지점의 밸브차단시 모의결과도 다소 동수두가 상승하나 크게 수압상승은 발생하지 않는 것으로 분석되었다.

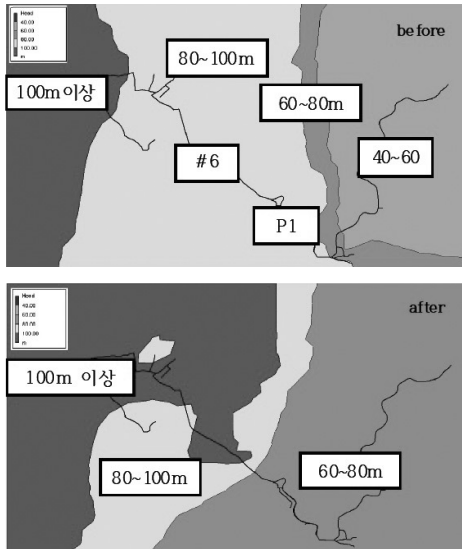


Fig. 9. Pressure distribution of B district before and after valve closing

5. 개선방안 도출 및 효과분석

5.1 개선방안 도출

A 및 B급수구역 모두 제한급수에 따른 수리거동 분석결과를 활용하여 급수시 2단계에서 발생하는 급격한 수압상승을 억제하고 누수복구 및 공기밸브 설치 등에 따른 추가 수압상승 등 장래 예상수압(A구역 : 2.5 kg/cm² ~ 7.9 kg/cm², B구역 : 3.2 kg/cm² ~ 9.8 kg/cm²)을 고려하여 높은 수압으로 인한 누수량 증가 및 관로파손에 대한 우려가 커 수압안정화 방안을 수립하고 이에 대한 수리모의를 통하여 그 효과를 분석하였다.

5.1.1 A급수구역 모의결과

A급수구역내 장래 예상수압 범위인 2.5 kg/cm² ~ 7.9 kg/cm²임을 고려하여 높은 수압으로 인한 누수량 증가 및 관로파손에 대한 우려가 커 감압밸브 설치를 통한 수압안정화 방법을 모의하였다. 또한 저지대지역은 약 7 kg/cm² 이상의 감압이 필요한 지역이 발생하여 1개의 감압밸브를 이용한 감압시 캐비테이션 발생이 우려되므로 고지대와 저지대를 구분하여 다단감압을 실시하는 것으로 모의하였다.

관망해석결과 1차 감압밸브 설치시 A급수구역의 최대수압은 7.1 kg/cm²이고 평균수압은 5.2 kg/cm²로 감압밸브 설치전 평균수압 9.3 kg/cm² 보다 4.1 kg/cm² 낮아졌으며, 누수량이 77.0 m³/day 저감된 것으로 조사되었다. 2차로 감압밸브를 추가로 설치했을 경우 A급수구역의 최대수압은 7.1 kg/cm²이고 평균수압은 4.8 kg/cm²로 1차 감압밸브 설치시 평균수압보다 0.4 kg/cm² 낮아졌으며, 누수량이 7.5 m³/day 저감되었다. 마지막으로 3번째 감압밸브를 설치했을 경우 A급수구역의 최대수압은 7.1 kg/cm²이고 평균수압은 4.0 kg/cm²로 2차 감압밸브 설치시 평균수압보다 0.8 kg/cm² 낮아졌으며, 누수량이 15.1 m³/day 저감되었고 3차 감압밸브 설치시 평균수압은 총 5.3 kg/cm²로 낮아졌으며, 누수량은 총 99.6 m³/day 저감되어 수압이 안정화된 것으로 해석됨에 따라 감압밸브 3개를 이용하여 다단 감압하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 이때 수압 개선효과와 저감 가능한 누수량을 Table 7에 수록하였다.

Table 7. Effects by installation of pressure reducing valve(PRV) for each case

Case	Pressure(kg/cm ²)		Leakage(m ³ /day)		Remark
	Mean	Max.	Mean	Reduction	
No PRV	9.3	9.7	174.7	-	-
1 st PRV	5.2	7.1	97.7	77.0	Pilot type(100 mm)
2 nd PRV	4.8	7.1	90.2	7.5	Pilot type(100 mm)
3 rd PRV	4.0	7.1	75.1	15.1	Direct type(80 mm)

5.1.2 B급수구역 모의결과

B급수구역의 관내 공기정체로 인한 통수단면적 감소에 따른 수두손실을 개선, 검토하기 위하여 관망해석을 통하여 공기밸브 설치효과를 알아보았다. Table 8에서와 같이 공기밸브 설치 전에는 약 35 m의 급격한 수두손실이 발생하여 조선포, 야포마을에 불출수가 발생하였으나, 수리해석결과 P1지점(개선전 지점) 전단에 공기밸브 설치 후 평균수압이 2.2 kg/cm²에서 9.2 kg/cm²로 높아지고, 불출수 지역도 없는 것으로 나타났다.

Table 8. Effects by installation of air valve

Case	Pressure(kg/cm ²)		
	Min.	Max.	Mean
Before installation	0.0	9.7	2.2
After installation	7.1	9.7	9.2

감압밸브 설치에 따른 관망해석결과, 감압밸브 설치전에는 B급수구역의 동수두 분포가 65 m 이상이며, 1차 감압밸브 설치시에는 동수두가 45 ~ 65 m의 분포를, 2차 감압밸브까지 설치시에는 동수두가 15 ~ 65 m, 최종 3차 감압밸브까지 설치시에는 동수두가 15 ~ 45 m의 분포를 보이고 있어, A급수구역과 동일하게 감압밸브 3개를 이용하여 다단 감압하는 것이 가장 효과적인 것으로 분석되었다.

5.2 효과분석

5.2.1 A급수구역

욕지 급수구역의 전반적인 수압안정화를 위해 파일롯식 2개소, 직동식 1개소의 감압밸브 3개를 설치하였다. 감압밸브와 압력유지밸브 설치결과 Fig. 10과 같이 비감압구역인 P1지점을 제외하고 모든 지점에서의 최대수압이 2.3 ~ 4.4 kg/cm²로 수압이 안정화된 것으로 분석되었다. 또한 당초 급수시 2단계에서 짧은 시간 동안 급

격한 수압 상승 0 ~ 4.0 kg/cm²이 급격하게 5분 이내에 발생하였으나, 감압밸브 설치후 2단계의 수압이 약 3.0 kg/cm² 까지 상승하는데 2시간이 소요되어 급격한 수압 상승을 방지하는 것으로 확인되었다. 감압밸브와 압력유지밸브를 이용해 수압을 제어할 경우 급수가 중단되면 감압밸브 1의 1차측(P1) 수압이 저하되고, 1차측 압력유지밸브가 작동, 차단됨에 따라 2차측에서 관성에 의해 순간 배제되어 급수중단시 부압이 발생되는데 이는 급수중단시 감압밸브 1의 1차측 수압(P1)이 급격하게 감소하여 압력유지기능에 의해 감압밸브가 닫히기 때문이다. 이러한 반복적인 부압현상에 따른 캐비테이션으로 밸브 및 관로에 파손이 예상됨에 따라 릴리프 밸브 등 추가적인 설비가 필요할 것으로 판단된다.

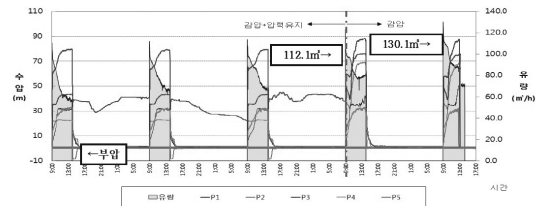


Fig. 10. Pressure variation by pressure reducing and sustaining in A district

5.2.2 B급수구역

당초 공기밸브 설치전에는 P1지점 전단인 G28지점의 동수두가 약 60 m이고, P1지점 후단인 G16지점의 동수두가 25 m로 약 35 m의 급격한 수두손실이 발생하였으나, 공기밸브 설치후 P6, P7지점으로 수압을 재측정한 결과 최대 8.1 m의 수두손실이 발생하는 것으로 확인되었다. 이는 공기밸브설치를 통해 제한급수시 관내 정체된 공기가 공기밸브를 통해 완전히 배제됨으로써 통수능이 확보된 것으로 추정할 수 있다. 또 당초 급수시 2단계에서 짧은 시간 동안 급격한 수압상승 0 ~ 2.2 kg/cm²이 단시간 10분 이내에 발생하였으나, 감압밸브 설치 후 2단계의 수압이 3.6 kg/cm² 까지 상승하는데 2시

Table 9. Pressure(kg/cm²) and total head(m) at P6 and P7 after air valve installation (Oct. 1st, 2012 ~ 2nd)

Site	Elevation(m)	Min.		Max.		Mean	
		Pressure(m)	Total Head(m)	Pressure(m)	Total Head(m)	Pressure(m)	Total Head(m)
P6	10.5	0.0	10.5	7.3	83.1	1.5	25.4
P7	3.0	0.0	3.0	7.2	75.0	1.7	20.3

간 이상이 소요되어 급격한 수압상승을 방지함으로써 수압의 안정화를 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구는 제한급수에 따른 수리특성을 분석하여 개선방안을 도출하고 실제 현장에 적용하여 그 효과를 분석함으로써 안정적인 용수공급에 기여하고자 한 것으로, 지금까지 관련 연구가 대부분 제한급수 공급특성을 고려한 설계에 머물렀으나, 운영시 발생하는 문제점들에 대하여 실제 현장을 대상으로 분석, 적용하였다는데 의의가 있으며 본 연구로부터 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 제한급수로 인한 급수와 단수의 반복적 흐름으로 급수시 급격한 수압상승이 발생되기 때문에 저지대의 경우 고수압이 형성될 수 있어 감압밸브를 설치에 따른 관망 해석 모의결과를 비교분석하여 수압변화에 따른 적정 운영방안이 수립될 수 있도록 하였다.
- (2) 급수재개 시작시점에서 수압의 급격한 상승현상을 다소 완화할 수는 있으나 초기 약 5 ~ 10분간의 급격한 수압 상승문제는 해결하기 어려운 것으로 모의되었다. 이를 위해 밸브의 개방속도를 완폐쇄 하는 방법으로 초기에 발생하는 수압상승에 대한 제어가 필요하다.
- (3) A급수구역과 같이 고수압이 예상되는 제한급수지역의 설계시 이로 인한 누수 및 관로파손을 예방하기 위해서는 고지대와 저지대를 구분, 다단감압이 효과적인 것

으로 분석되었으며 공급중단시 감압밸브 차단에 따른 후단 부압이 발생하는 것으로 나타나 이를 방지하기 위한 추가시설이 필요하다.

- (4) B급수구역에서는 제한급수지역에 따른 급수와 단수가 반복되는 경우 단시간에 수압의 상승과 관내 생성되는 공기에 대한 문제점을 감압밸브와 공기밸브의 설치를 통하여 해결할 수 있는 방안과 그 효과를 수리해석 결과로 제시하였다.

참고문헌

Kim K.P. (2009), *Development and Applicability Evaluation of Optimal Leakage Management Model in Water Distribution Networks*, Ph.D Dissertation, Univ. of Seoul.

Park J.H. et al. (2011), *A Study on Mitigation Techniques of Water Hammer by Valve Closure in Transmission Systems*

Lee S.J et al. (1996), *Investigation and Analysis of Intermittent Water Supply Problems during Drought*, Proceeding of KWWA Conference.

Taebaek city (2009), *White Paper of Drought in Taebaek City*.

K-water (2009), *Guide Book of Revenue Water Improvement and Management in Water Distribution Systems*.

K-water (2010), *Technical Guide Book for the Implementation of Optimal Management Systems and Standard of Procedure in Water Distribution Systems*.

Ministry of Environment (2010), *Standard of Water Facilities*

Ministry of Environment (2011), *Water Statistic*

Brunone, B., Golia, U.M., and G reco, M. (1995), *Effects of two-dimensionality on pipe*

- transients modelling, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, **121(12)**, 906–912.
- Kalanithy Vairavamoorthy (1994), *Water Distribution Networks: Design and Control for Intermittent Supply*, Ph.D Dissertation, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London, UK
- Kalanithy Vairavamoorthy, et al. (2001), *Design of sustainable water distribution systems in developing countries*.
- Lewis A. Rossman (2000), *EPANET2 Users Manual*, Water Supply and Water Resources Division National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH 45268.
- Lingireddy S. and Don J. Wood (2002), University of Kentucky. Naftali Zloczower, *Pressure Surges Due to Air Release*.
- Paul F. Boulous etc. (2005), Hydraulic transient guidelines for protecting water distribution systems, *Journal AWWA* 97:5
- Pezzinga G. (1999), Quasi-2D model for unsteady flow in pipe networks, *Journal of Hydraulic Engineering, Proceedings of ASCE*, **Vol. 125**, No. 7, 676–685.
- Rajiv Batish, 2003, *A New Approach to the Design of Intermittent Water Supply Networks*, World Water & Environment Congress 2003.
- Surendran S., S.V. Senarathne and M.D. Smith, 1997, *Study of Water Usage in Rural Areas*, 23rd Water, Engineering and Development Centre(WEDC) Conference.
- T. T. Tanyimboh et al. (2001), Appraisal of Source Head Methods for Calculating Reliability of Water Distribution Networks, *J. of Water Resour. Plng. and Mgnt., ASCE* 127(4)
- Yochanan Dvir (1997), *Flow control device*, Lehavot Habashan 12125, Israel, Control Appliances Books.